

해수교환방과제의 진동수로에서의 수위 공진

○이 창 훈*, 이 달 수*

1. 서론

방과제는 폭풍우 등 자연재해가 발생할 때 항내의 시설물을 보호하고 또한 평상시 항 내에서 정박 및 하역이 원활하도록 정온한 해역을 유지할 목적으로 건설된다. 그런데, 육지에서부터 오염물이 항내로 유입하면 정온한 해역에서는 항내·외 해수교환이 잘 되지 못하므로 악취가 발생하고 경관이 흐린 문제가 발생하고 있다. 이를 해결하는 방법에는 오염원을 차단하고 오염된 저질을 준설하는 것이 있다. 그리고, 토목기술자들이 수질을 보전하는 방법으로 해수교환방과제를 건설하는 것이 있다. 이 방과제는 일본에서 1960년대부터 건설되기 시작하였는데 이는 흐름특성상 두가지로 분류될 수 있다. 첫째는 단순히 방과제의 단면의 일부를 절개하거나 구멍을 뚫어 방과제를 중심으로 항내·외로의 양방향흐름을 허용하는 것이고, 둘째는 방과제를 중심으로 항외에서 항내로 일방향 흐름을 유도하여 이 물이 항입구로 흘러나가게 하는 것이다. 일방향흐름을 유도하는 것이 항내오염물을 희석시키고 항 밖으로 유도하는데 양방향흐름을 유도하는 것에 비하여 더 효과가 있는 것으로 알려져있다.

한편 국내에서는 Lee 등(1994)이 케이슨식 방과제 전면에 구멍을 뚫어 원호형의 수로를 만들고 이 수로가 항의 안쪽으로 파이프로 연결되는 구조물을 개발하였다. 소위 공진주기에서 원호형수로에서 해수면의 진동폭이 증폭되는 현상을 발견하였다. 또한 원호수로에 파이프가 연결되는 지점을 평균수면에 둘 때 평균수면의 위나 아래에 두는 경우에 비하여 일방향흐름이 최대가 되는 것을 발견하였다.

그런데, 원호형의 수로가 내장된 해수교환방과제를 실제로 건설하는데 어려움이 있다. 대개의 경우 케이슨이 시공상 간편한 직사각형의 cell 로 구성되어 있는데 케이슨 내의 수로가 원호형으로 되어 있어서 이러한 형상이 있는 케이슨을 시공하기가 까다로운 어려움이 있다. 이를 극복하기 위해 이달수 등(1999)은 최근 해수교환방과제의 실용화연구를 하였다. 1차년도 연구 결과 그들은 수로의 단면을 원호형이 아니라 L자형으로 하여 시공성을 향상시켰고, 또한 수로의 앞 또는 뒤에 유수지를 두어 수로를 통한 해수의 유통 효율을 향상시켰다.

본 연구에서는 새로 개발된 해수교환방과제에서 L자형의 수로를 통한 해수의 유동에 적용될 수 있는 공진주기를 예측하고 수리모형실험을 통하여 예측된 공진주기에서 해수의 유동이 증폭되고 또한 이 주기에서 해수의 유입량이 증폭되는 것을 확인하였다.

2. 진동수로의 공진주기

진동수로를 통한 흐름에서의 공진주기는 다음과 같은 유체동역학의 원리를 사용하여 구할 수 있다. 그림1에 진동수로의 형상을 도시하였다. 방과제 내의 진동수로를 따라 입구부터 수로내 해수면까지 Euler 식을 적분하면 다음과 같다.

$$\frac{0 - p_1}{\rho} + g(\eta_c - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} ds = 0 \tag{1}$$

* 한국해양연구소 연안 · 항만공학연구센터

위 식에서 p 는 압력이고, η_c 는 수로내 수면의 연직방향의 위치이고, v 는 유속이고, ρ 는 해수의 밀도이고, g 는 중력가속도이고, z 는 평균해수면으로부터 연직방향의 위치이고 t 는 시간이고, s 는 진동수로를 따른 공간좌표이고, 아래첨자 1, 2는 각각 진동수로의 입구와 진동수로내 수면을 나타낸다. 진동수로의 입구와 수면 사이에 연속방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$Q = vA = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (2)$$

수면에서 운동학적 경계조건을 적용하면 다음과 같다.

$$v_2 = \frac{\partial \eta_c}{\partial t} \quad (3)$$

식 (2), (3)을 이용하면 식 (1)의 우변 마지막 항을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} ds = \int_1^2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \eta_c}{\partial t} \frac{A_2}{A} \right) ds = \frac{\partial^2 \eta_c}{\partial t^2} \int_1^2 \frac{A_2}{A} ds \quad (4)$$

식 (1)에서 비선형항($(v_2^2 - v_1^2)/2$)을 무시하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$p_1 = \rho g(\eta_c - z_1) + \rho \frac{\partial^2 \eta_c}{\partial t^2} \int_1^2 \frac{A_2}{A} ds \quad (5)$$

파랑이 각주파수 ω 로 전파하는 경우 진동수로 입구의 압력 p_1 과 진동수로내 수면의 위치 η_c 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_1 = \overline{p_1} \cos(\omega t + \varepsilon_p), \quad \eta_c = \overline{\eta_c} \cos(\omega t + \varepsilon_\eta) \quad (6)$$

위 식에서 bar를 붙인 것은 진폭을 의미하고 ε_p , ε_η 는 각각 압력과 수면의 위상을 의미한다. 식 (6)을 식 (5)에 대입하면 다음과 같다.

$$\overline{\eta_c} \cos(\omega t + \varepsilon_\eta) = z_1 + \frac{\overline{p_1}}{\rho g \left(1 - \frac{\omega^2}{g} \int_1^2 \frac{A_2}{A} ds \right)} \cos(\omega t + \varepsilon_p) \quad (7)$$

식 (7)의 우변 두 번째 항의 분모가 0이면 임의의 압력에 대하여 수면의 진폭이 무한히 커지게 된다. 이 현상이 바로 공진이고 이때의 공진각주파수 ω_r 는 다음과 같다.

$$\omega_r = \sqrt{\frac{g}{\int_1^2 \frac{A_2}{A} ds}} \quad (8)$$

그리고, 공진주기 T_r 은 다음과 같다.

$$T_r = \frac{2\pi}{\omega_r} = 2\pi \sqrt{\frac{\int_1^2 \frac{A_2}{A} ds}{g}} \quad (9)$$

진동수로의 단면적이 모두 똑같은 경우, 즉 $A = A_1 = A_2$, 진동수로의 길이를 l 이라고 하면 공진주기는 다음과 같다.

$$T_r = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (10)$$

즉, 진동수로의 단면적이 수로 연장을 따라 균일한 경우에 공진주기는 진동수로 길이의 제곱근에 비례함을 알 수 있다. 진동수로의 단면적의 변화에 따라 공진주기가 달라지게 된다. 만약 진동수로 입구보다 진동수로 내 수면의 단면적이 큰 경우 $\int_1^2 (A_2/A) ds > l$ 이 되고 그때의 공진주기가 단면적이 일정한 경우의 공진주기(즉, 식 (10)의 T_r)에 비하여 크다. 만약 진동수로 입구보다 진동수로 내 수면의 단면적이 작은 경우 $\int_1^2 (A_2/A) ds < l$ 이 되고 그때의 공진주기가 단면적이 일정한 경우의 공진주기에 비하여 작다.

3. 후위유수지 내장 진동수로 혼성제를 통한 흐름

이달수 등(1999)은 처음 개발한 원호수로형 해수교환방파제 외에 여러 유형의 해수교환방파제를 개발하였다. 그 가운데 후위유수지 내장 진동수로 혼성제는 이름이 의미하듯이 유수지가 수로의 뒤에 있고 수로는 L자형으로 구성되어 있다(그림 2 참조).

진동수로 내에서 공진현상이 발생하는지 확인하기 위해 후위유수지 내장 진동수로 혼성제의 모형에서 진동수로와 유수지 사이를 차폐하여 규칙파에 의한 수위의 변화를 관측하였다. 이 진동수로의 입구부터 수로내 정지수위까지의 길이는 26.45cm이다. 식 (10)을 사용하여 공진주기를 구하면 $T_r = 1.03s$ 이다. 그림 3에 수면의 최대 상승고를 입사파고로 나누어 무차원화한 값을 입사파고(H) 및 주기별로 도시하였다. 수면 상승고가 최대가 되는 주기, 즉 공진주기는 1.1s로부터 1.4s 사이에 있었고 그 평균치는 1.22s였다. 이는 이론적으로 예측한 공진주기 $T_r = 1.03s$ 보다 18% 큰 값이다. 본 연구에 사용한 수로는 유선형으로 구성되어 있지 않고 직선형의 조합으로 구성되어 있기 때문에 흐름이 원활하지 못하다. 따라서, 본 연구에서 관측된 공진주기는 흐름이 원활하다는 가정하에 예측된 공진주기에 비하여 더 크지 않나 판단된다.

한편, 그림3의 수평 점선은 입사파가 직립벽으로 입사할 때 벽면에서 발생하는 이론적인 최대의 수면 상승고를 의미한다. 진동수로 내에서는 공진 현상에 의해 주기가 극히 짧은 파의 경우를 제외하고는 최대의 수면 상승고가 이 값보다 크며 공진주기 부근에서는 2배가 넘는 정도로 증폭됨을 볼 수 있다. 이로써 해수교환방파제에 사용된 진동수로의 효율성은 명백히 증명된다.

이번에는 후위유수지 내장 진동수로 혼성제를 통한 유량에 대하여 규칙파 실험을 하였다. 본 모형에서 진동수로의 단면은 일정하지 않고 턱을 넘어서면 단면적이 커지게 된다. 식

(9)에서 $\int_1^2 (A_2/A) ds > l$ 이므로 공진주기는 위에서 예측한 1.03s보다 클 것으로 예측된다.

진동수로 배후의 유수지 턱의 높이를 +2cm, +4cm, +6cm로 달리하고, 또한 파고와 주기를 달리하면서 파랑을 입사시키고 파이프를 통하여 흐른 유량을 측정하였다.

유량이 최대가 되는 경우의 주기, 즉 침두주기(T_p)는 1.0s에서 1.6s 사이에 있었다. 빈도수를 가중평균한 침두주기는 $T_p=1.34s$ 가 된다. 이 실측치는 예측된 공진주기 $T_r=1.03s$ 에 비하여 30% 더 컸다. 공진주기의 예측치는 진동수로의 단면적이 균일하다는 가정에서 나온 것인데 실제 수로의 단면적은 턱을 넘어서는 유수지의 면적까지 확대되므로, 즉 식 (9)에서

$\int_1^2 (A_2/A) ds > l$ 이므로, 공진주기가 1.03s보다 클 것이고, 이는 실측치에 근사한 쪽으로 가는 것이다. 대체로 파고가 클수록 침두주기가 약간 큰 경향이 있다. 이는 파고가 클수록 동일한 턱을 넘어가는 유량이 많고 또 진동수로 내의 수위가 턱을 넘어 단면적이 큰 구역에서 지체하는 시간이 많은 등의 이유로 추측되나 현 단계에서 구체적으로 알 수 없다. 그러나 이 현상은 방파제 단면을 설계할 때 유량을 증대시키기 위해 매우 중요한 설계인자가 되는 것이므로 향후 심층적인 연구가 필요하다. 실험결과와 한 예로서 입사파고가 $H=2.8cm$ 인 경우 유수지 턱 높이와 주기에 따른 유량을 그림3에 도시하였다. 이 경우 공진주기는 1.1s, 1.15s, 1.4s였다.

4. 결론

해수교환방파제에서 L자형 진동수로내 수위의 진폭 및 진동수로를 통한 유량이 최대가 되는 공진주기를 예측하였다. 해수교환방파제 가운데 후위유수지 내장 진동수로 혼성제에 규칙파가 내습할 경우에 수리모형실험을 실시하였다. 그 실험에서 수로내 수면의 증폭의 정도와 수로를 지나 항내로 유입하는 유량을 관측하여 어느 주기에 공진이 발생하는지 확인하였다. 그 결과 관측된 공진주기는 예측된 공진주기에 비하여 약간 크게 나왔다. 예측된 공진주기가 흐름이 원활하다는 가정 하에서 유도되었는데 실제 L자형 수로는 흐름이 원활하지 못하여 지체되고, 또한 수로폭이 유수지와 만나는 지점에서 커짐으로써 흐름이 지체되었을 것이다. 따라서, 관측된 공진주기가 예측치에 비하여 커지지 않았나 판단된다.

본 연구에서는 규칙파의 경우에 공진주기의 예측치와 관측치를 비교하였는데 장차 불규칙파의 경우에도 비교·검토함으로써 본 연구에서 유도된 공진주기가 실제로 적용 가능함을 보이겠다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 연구과제 “해수교환방파제의 실용화연구 용역” 결과의 일부이다.

참고문헌

- 이달수 등. (1999). 해수교환방파제의 실용화연구 (I), 해양수산부 (연구기관: 한국해양연구소).
 Lee, D.S., Park, W.S. and Kobayashi, N. (1994). Circular channel breakwater to reduce wave overtopping and allow water exchange.

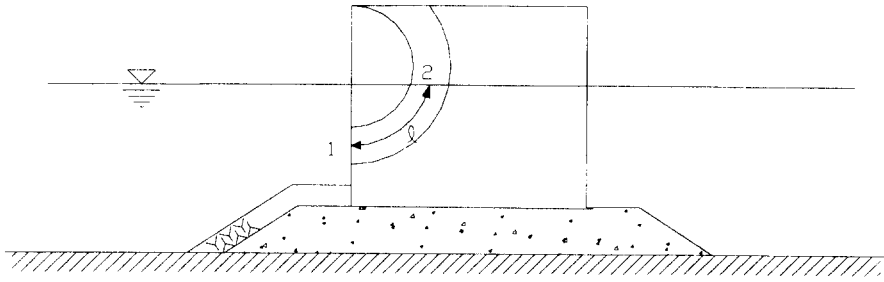


그림 1. 진동수로의 공진주기 안정시 단면형상

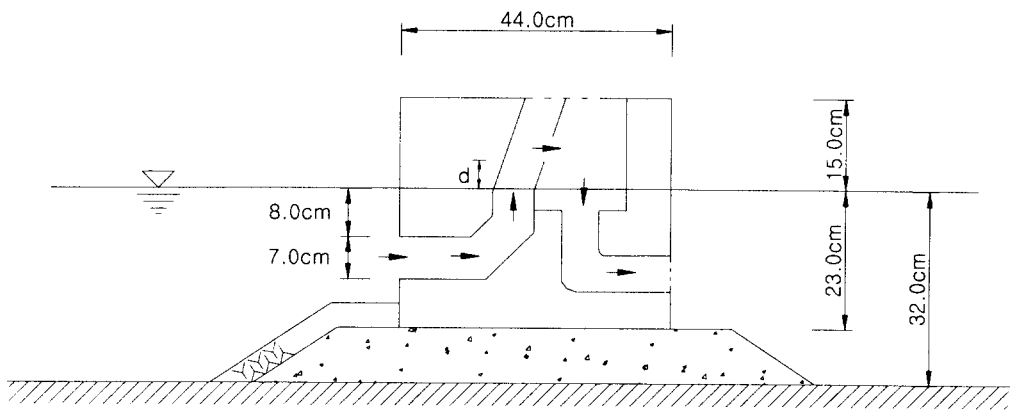


그림 2. 후위유수지 내장 진동수로 혼성체의 모형 단면

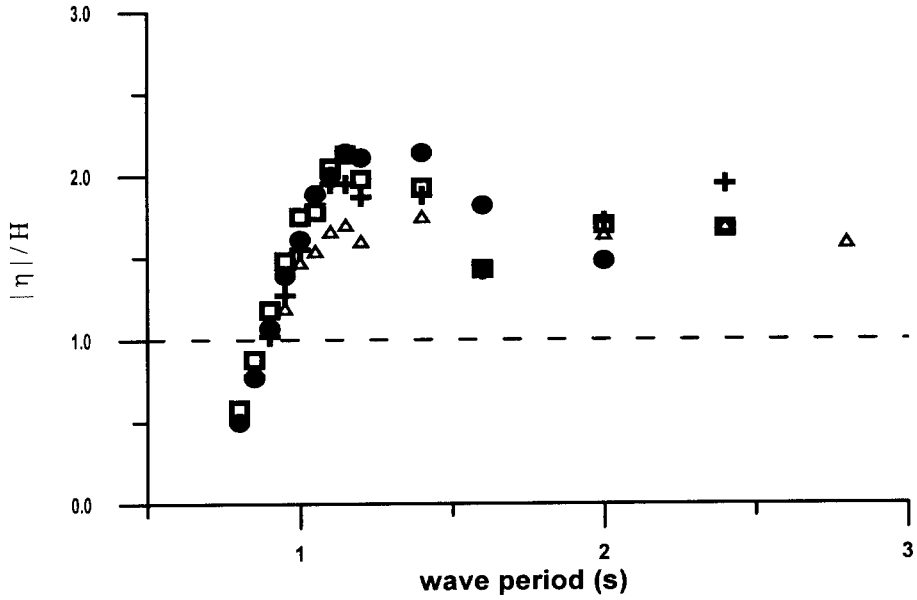


그림 3. 진동수로내의 수면 상승고

(● : $H = 2.8\text{cm}$, ◻ : $H = 4\text{cm}$, + : $H = 6\text{cm}$, ▲ : $H = 8\text{cm}$)

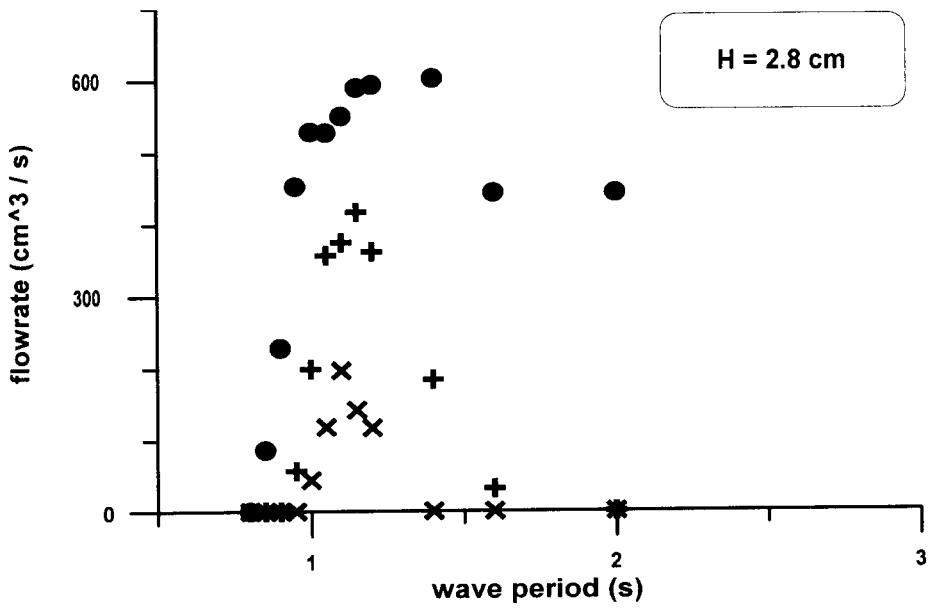


그림 4. 후위유수지 내장 진동수로 혼성제를 통한 유입유량

(● : 턱 높이 = 2cm, + : 턱 높이 = 4cm, x : 턱 높이 = 6cm)